

PERILAKU PERPINDAHAN PANAS DALAM PROSES PENYANGRAIAN DENGAN MEDIA PASIR

Behavior of Heat Transfer in Roasting Process with Sand Media

Sugiarto, R.¹, Budi Rahardjo² dan Suhargo²

Program Studi Teknik Pertanian

Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

ABSTRACT

The research aimed to study the lump heat capacity analysis. It was observed the solution of coefficient analysis of surface heat transfer (h) with influenced factors in roasting process by sand media used rotary roaster. The experiment used ball like model made from clay as roasted material and brass ball as a comparison under a relative constant temperature at 120 °C.

Function relationship of $(\pi_1) = C.(\pi_2)^p.(\pi_3)^q$ was established using dimension analysis. The constant C , p and q were obtained through multiple linear regression analysis. The parameter h was required through dependent variables.

Based on a analysis with two independent variables d_m and N could be obtained empirical function of surface heat transfer coefficient h ($W/m^2\text{°C}$) as follows:

$$h_{pred} = C. \left(\frac{k_m}{d_b} \right) \left(\frac{k_m}{\rho_m \cdot C_{p_m} \cdot N \cdot d_b^2} \right)^a \left(\frac{d_b}{d_m} \right)^b$$

with k_m = sand thermal conductivity ($W/m\text{°C}$); ρ_m = media density (kg/m^3); C_{p_m} = media specific heat ($J/kg\text{°C}$); d_m = media diameter (m); N = rotating of roasting (rpm); d_b = diameter of roasted materials (m) and a , b and C = constants. The applicability of established temperature function for h in predicting temperature of roasting material during roasted had been successfully provide.

Keywords: *roasting – coefficient of heat transfer and Dimension analysis.*

PENGANTAR

Proses pengeringan merupakan proses kompleks yang meliputi hubungan simultan antara panas transien, transpor massa dan momentum (Mujumdar, 1997). Diidentifikasi terdapat beberapa tipe dasar pengeringan yang didasarkan pada bentuk input panas, antara lain pengeringan konveksi, konduksi, radiasi; pemanasan dielektrik maupun kombinasi satu atau lebih dari model-model tersebut.

1) Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian (INTAN) Yogyakarta.

2) Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

Pengeringan secara konvensional dengan aliran udara panas atau pengeringan konveksi banyak dilakukan karena relatif mudah penanganannya dan tidak berakibat terkontaminasinya produk biji-bijian yang dikeringkan. Namun menurut Keey (1972), disebutkan bahwa pemanfaatan udara sebagai media pengeringan merupakan suatu proses yang tidak efisien akibat dari udara yang akan menjadi jenuh sebelum kalor sensibel digunakan. Selain itu terdapat kelemahan dari sistem pengeringan dengan udara panas berupa rendahnya keseluruhan efisiensi termal yang akibat koefisien penghantara panas dan kapasitas panas jenis udara yang relatif rendah (Finney *et al.* (1963)). Proses pengeringan biji-bijian hasil pertanian dapat juga dilakukan secara kontak langsung melalui proses pencelupan dengan pengadukan produk didalam bahan butiran atau partikel (*particulate materials*) panas yang dikenal sebagai proses penyangraian. Beberapa kelebihan dapat diperoleh dari proses penyangraian ini, diantaranya adalah efisiensi termal yang relatif tinggi (>60 %) dengan waktu penyangraian yang relatif singkat (Richard dan Raghavan, 1984). Selain itu untuk media penyangraianya dapat digunakan butiran garam, pasir halus, pasir kwarsa, zeolit atau dari bahan butiran halus lainnya dalam berbagai ukuran (Dadi Rusendi dkk, 1998). Pengadukan perlu dilakukan agar biji-bijian dapat terselimuti oleh butiran media pengering sehingga terjadi penghantaran panas secara konduksi (Richard dan Raghavan, 1984). Penggunaan media penyangraian berbentuk butiran dimaksudkan untuk memperbesar laju perpindahan panas secara konduksi, selain untuk mencegah kemungkinan terjadinya pemanasan yang berlebihan.

Untuk mempelajari fenomena perpindahan panas dan massa dalam proses penyangraian perlu dilakukan penelitian guna memperoleh suatu model matematika analisis perpindahan/penghantaran panas dan laju penurunan kadar air. Dalam hal ini akan dikembangkan pendekatan model analisis riwayat suhu bahan untuk penentuan nilai koefisien penghantaran panas permukaan (h) dan analisis laju penurunan kadar air untuk penentuan nilai konstanta penyangraian (K), sekaligus pendekatan model analisis prediksinya.

CARA PENELITIAN

Pengembangan Model. Proses penghantaran/perpindahan panas melalui media butiran atau partikel panas dipandang sebagai proses aliran panas transien dalam sistem dengan tahanan dalam yang dapat diabaikan. Dengan asumsi tahanan termal dalam sangat kecil, maka suhu didalam sistem dapat dianggap seragam pada setiap saat (Kreith, 1973). Asumsi ini berlaku apabila tahanan luar antara permukaan sistem

dan media sekitarnya adalah sangat besar jika dibandingkan dengan tahanan dalam sistem sehingga tahanan luar mengendalikan proses perpindahan panas tersebut.

Menurut Kreith (1973), sebagai pedoman pertimbangan relatif dari tahanan termal di dalam suatu benda padat adalah perbandingan tahanan termal dalam terhadap tahanan termal luarnya. Perbandingan ini dapat ditulis dalam bentuk tanpa dimensi sebagai suatu bilangan Biot, yakni : $N_{Bi} = h.L_s/k$. Dalam hal ini kesalahan yang diakibatkan oleh asumsi bahwa suhu dianggap seragam pada setiap saat akan kurang dari lima persen jika tahanan termal dalamnya lebih kecil 10 persen dari pada tahanan termal luarnya, atau $h.L_s/k < 0,1$. Menurut Özisik (1980), L_s didefinisikan sebagai karakteristik panjang yang akan menjamin penerapan sistem aliran panas atau $L_s = V/A_s$.

Salah satu analisis terhadap proses pemanasan dengan media partikel panas diasumsikan suhu dalam benda dapat dikatakan seragam pada setiap saat yang dikenal sebagai analisis kapasitas panas tergabung (*Lump heat capacity analysis*), maka kesetimbangan energi selama selang waktu yang kecil dt adalah :

Perubahan energi dalam butiran selama dt = aliran panas dari media pengering ke butiran selama dt

$$\rho.V.C_p.dT = -\bar{h}A_s(T - T_-)dt \quad (1)$$

Dengan pemisahan terhadap variabel T dan t pada selang waktu deferensial dt dan karena T_- relatif konstan, maka dengan suhu awal T_0 dan suhu T pada waktu t akan diperoleh :

$$\frac{(T - T_-)}{(T_0 - T_-)} = e^{-(\bar{h}A_s / \rho C_p V)t} \quad (2)$$

Selanjutnya persamaan (2) dapat ditulis dalam formula tanpa dimensi (Heldman, 1981) dengan persamaan :

$$\frac{(T - T_-)}{(T_0 - T_-)} = e^{-[(N_{Bi}) (N_{Fo})]} \quad (3)$$

N_{Fo} adalah modulus atau bilangan *Fourier* yang didefinisikan sebagai : $N_{Fo} = a.t/L_s^2$.

Pengembangan model analisis perubahan suhu bahan (biji) terhadap persamaan (3) akan dihasilkan :

$$\theta = \frac{(T_i - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)} = e^{-\frac{h.A}{\rho.Cp.V}t} \quad (4)$$

sehingga diperoleh :

$$\ln \theta = -\frac{h.A}{\rho.Cp.V}t \quad (5)$$

Dari persamaan (5) dihasilkan persamaan gradien atau kelerengan $a = -(h.A)/(r.Cp.V)$ maka dari data empiris diperoleh persamaan observasi untuk koefisien h berikut sebagai :

$$h = -\frac{a.(r.Cp.V)}{A} \quad (6)$$

Metode Analisis Dimensi. Terdapat tiga tahapan proses analisis untuk memperoleh persamaan model dengan metode analisis dimensi (Watkins dan Shupe, 1976), yakni :

1. Penetapan daftar beberapa parameter penting yang diduga berhubungan kuat dengan fenomena yang terjadi.
2. Proses analisis dimensi terhadap parameter berpengaruh dengan menggunakan dimensi dasar dari masing-masing parameter.
3. Menjadikan suatu bentuk persamaan umum atas dasar tahapan proses analisis dimensi diatas.

Dengan memperhatikan segala asumsi dan batasan yang ada maka dikembangkan pendekatan model analisis dimensi dalam bentuk bilangan tanpa dimensi (p) (Glenn Murphy, 1950), sehingga dihasilkan model persamaan sebagai berikut :

$$\left(\frac{h.d_b}{k_m}\right) = C \left(\frac{k_m}{\rho_m.Cp_m.N.d_b^2}\right)^p \left(\frac{d_b}{d_m}\right)^q \quad (7)$$

dengan : $p_1 = (h.d_b/k_m)$; $p_2 = (k_m/r_m.Cp_m.N.d_b^2)$ dan $p_3 = (d_b/d_m)$. Sehingga diperoleh model matematika persamaan umum koefisien h prediksinya adalah :

$$h_{pred} = C \left(\frac{k_m}{\rho_m.Cp_m.N.d_b^2}\right)^p \left(\frac{d_b}{d_m}\right)^q \quad (8)$$

Persamaan tersebut akan digunakan dalam penentuan suhu prediksinya dengan memanfaatkan persamaan (2) terdahulu. Sehingga suhu model bijian (T) pada setiap saat dapat diprediksikan sebagai :

$$T_{pred} = f(T_0, T_\infty, h, r_m, Cp_m, d_b, t) \quad (9)$$

Tabel 1. Daftar simbol

A	= luas permukaan bahan	m^2
C	= konstanta (tanpa dimensi)	
Cp	= panas jenis bahan	$J/kg.^{\circ}C$
d	= diameter	m
h	= koefisien penghantaran panas	$W/m^2.^{\circ}C$
k	= konduktivitas termal	$W/m.^{\circ}C$
L_s	= karakteristik panjang bahan	m
N	= kecepatan putar	rpm
N_{Bi}	= bilangan Biot	
N_{Fo}	= bilangan Fourier	
T	= dimensi suhu	$^{\circ}C$
t	= waktu	$sekon / menit$
V	= volume bahan	m^3
a	= difusivitas termal	m^2/s
p	= peubah	
r	= densitas bahan	kg/m^3
Subskrip :		
b	= bahan (biji)	
e	= kondisi setimbang	
m	= media penyangrai	
s	= permukaan	
\sim	= kondisi lingkungan (media)	

Pengumpulan Data dan Analisis. Uji laboratorium yang dilakukan berupa uji sifat fisik bahan dan media pengering serta uji proses penyangraian dengan pendekatan analisis dimensi untuk keperluan analisis data. Pengambilan data suhu dilakukan dengan menggunakan perangkat komputer dan *datalogger/micrologger* lengkap (termasuk *interface*) serta dilengkapi dengan sensor suhu (termokopel tipe K yang

pada kondisi suhu media penyangraian ditetapkan sekitar 120°C dalam beberapa variasi perlakuan antara lain : 3 aras rerata diameter (d_m) butiran media (pasir) yakni 0,223 mm; 0,569 mm dan 1,020 mm dan 3 aras kecepatan putar pengadukan (N) yakni 8; 16 dan 24 rpm. Untuk keperluan ini dibuat model biji dari bahan tembikar dengan bahan pembanding berupa model biji (bola) logam dari bahan kuningan dengan rerata diameter 15 mm. Mesin penyangrai yang digunakan adalah jenis penyangrai putar (*rotary roaster*) dengan skala laboratorium yang dapat diatur kecepatan putarnya.

Analisis data dilakukan terhadap data pengamatan untuk mendapatkan hasil observasi nilai koefisien h . Sedangkan nilai prediksi h yang diinginkan diperoleh melalui metode analisis dimensi dengan memanfaatkan nilai observasi yang telah diperoleh. Untuk mempermudah analisis data pengamatan dan dalam penyusunan model matematika persamaan prediksinya digunakan bantuan beberapa program analisis seperti *Microsoft Excel*, *SPSS* dan *SigmaPlot*.

Uji Validitas. Uji validitas dilaksanakan untuk mengetahui kesahihan dari model matematika yang dihasilkan untuk peubah tak bebas ($h.d/k_m$) dan koefisien h prediksi terhadap nilai observasinya dengan analisis statistik maupun secara grafis.

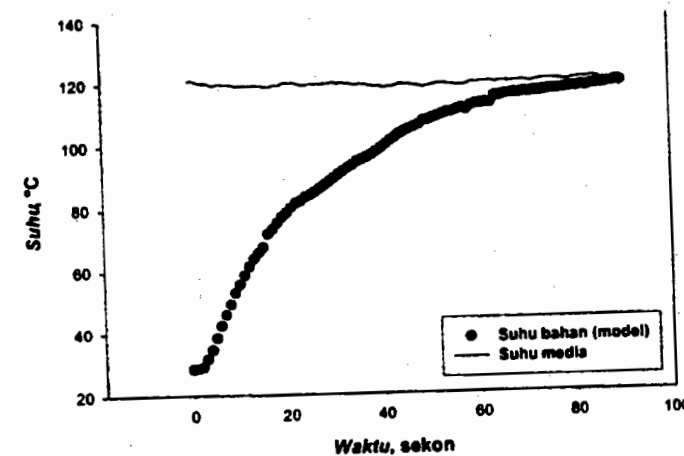
Analisis statistik dilakukan untuk pengujian terhadap linieritas hubungan antara nilai observasi dan prediksinya dengan metode analisis variansi pada selang kepercayaan 95 % dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan. Analisis grafis dapat dilakukan untuk mengetahui gambaran tentang keterkaitan antara nilai prediksi dan observasinya melalui gradien persamaan kurva regresi linier yang dihasilkan. Untuk kurva linier dengan nilai gradien mendekati satu dengan melewati titik koordinat (0,0) maka model prediksi dapat dinyatakan valid (shahih).

Uji Kepekaan Model dilakukan terhadap persamaan (8) dengan mengubah parameter bebasnya (sebagai variabel masukan) berupa : kecepatan putar pengadukan (N) dan diameter butiran media (d_m) serta nilai prediksi koefisien penghantaran panas permukaan (h) sebagai variabel keluaran. Penilaian terhadap kepekaan model sangat terkait dengan besarnya persentase perubahan pada variabel keluaran terhadap nilai awalnya. Dengan demikian perubahan yang terjadi dapat bersifat menaik maupun menurun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Observasi dan Prediksi

Hasil pengamatan atau observasi terhadap riwayat suhu model bijian (bola logam kuningan) selama proses penyangraian menunjukkan pola kurva eksponensial dengan menyerupai bentuk kurva sigmoidal. Riwayat suhu hasil pengamatan suhu bahan (T_b) serta suhu media (T_m) diperlihatkan pada contoh gambaran kurva yang dihasilkan pada perlakuan kecepatan putar pengadukan 8 rpm (N_1) dan diameter butiran partikel media 0,223 mm (d_{m1}) untuk ulangan 1 yang ditunjukkan pada Gambar 1.

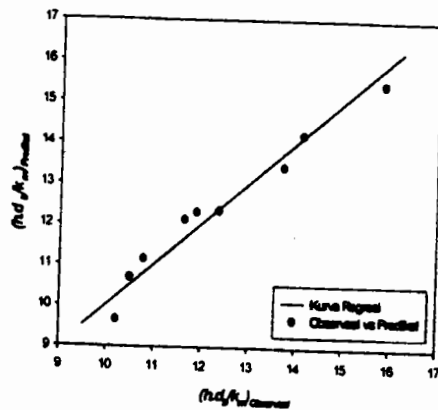
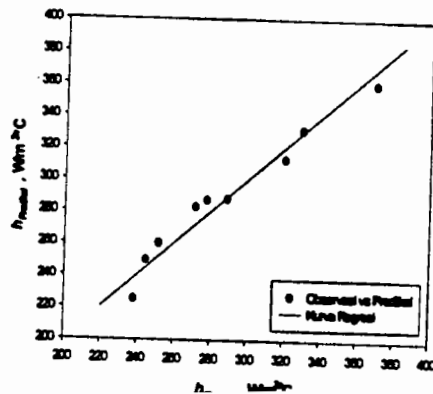


Gambar 1. Pola kurva riwayat suhu bola logam (kuningan) selama penyangraian.

Adapun analisis kelerengan nisbah suhu terhadap data observasi suhu awal (T_0), suhu setiap saat (T_t) dan suhu media penyangraian (T_m) menghasilkan nilai kelerengan kurva untuk berbagai perlakuan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai kelerengan nisbah suhu atau kelerengan kurva ($a = \ln q / dt$).

Perlakuan		Ulangan		
Kecepatan putar pengadukan N (rpm)	Diameter media d_m (mm)	1	2	3
8	0,223	-0,03281	-0,03696	-0,03346
	0,569	-0,03085	-0,03045	-0,02973
	1,020	-0,02901	-0,03034	-0,02945
16	0,223	-0,04183	-0,03989	-0,04595
	0,569	-0,03666	-0,03718	-0,03353
	1,020	-0,03083	-0,03176	-0,03095
24	0,223	-0,04589	-0,04517	-0,04651
	0,569	-0,03908	-0,04175	-0,03833
	1,020	-0,03327	-0,03443	-0,03333

Gambar 2. Diagram uji validitas model prediksi peubah ($h.d_b/k_m$).

Analisis lebih lanjut terhadap kurva kelerengan nisbah suhu diatas dengan memanfaatkan persamaan (6) diperoleh nilai koefisien penghantaran panas permukaan (h) hasil observasi. Data hasil analisis nilai koefisien (h) observasi dari seluruh perlakuan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai koef. penghantaran panas permukaan (h) Observasi dan Prediksi ($W/m^2.C$)

Diameter media d_m (mm)	Kecepatan putar pengadukan N (rpm)					
	8		16		24	
	Observasi	Prediksi	Observasi	Prediksi	Observasi	Prediksi
0,223	277,714	287,091	329,920	331,385	370,091	360,399
0,569	244,885	249,463	288,856	287,952	320,545	313,163
1,020	238,357	225,183	251,194	259,926	271,747	282,684

Analisis selanjutnya untuk nilai prediksi h dilakukan dengan dikembangkannya suatu langkah analisis untuk keperluan analisis regresi linier berganda terhadap logaritma fungsi-fungsi peubah dari penyusun model analisis dimensi koefisien penghantaran panas permukaan (h).

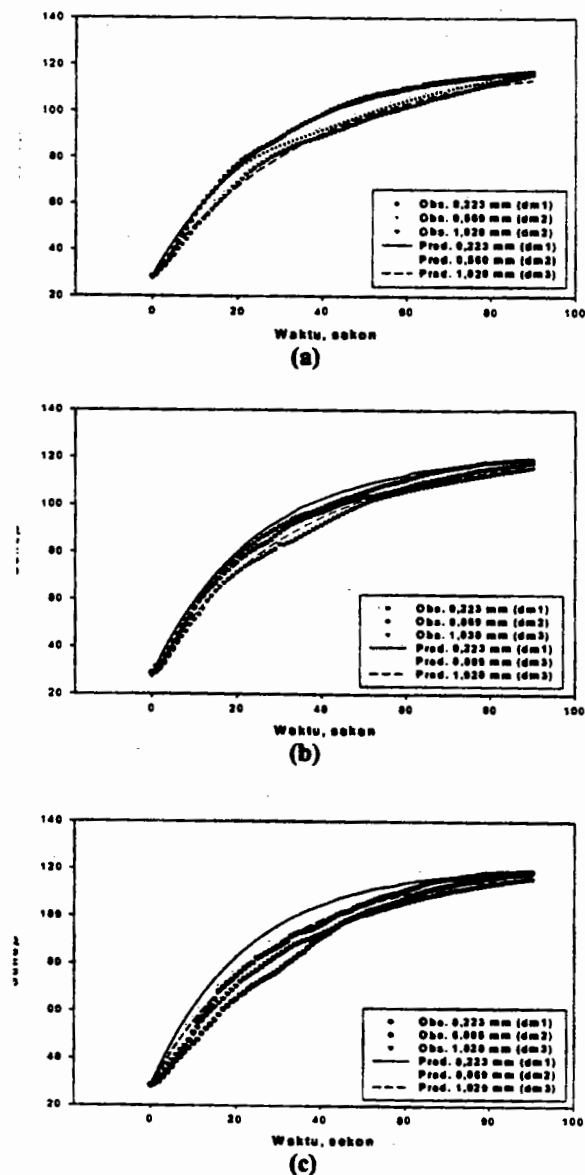
Hasil analisis regresi linier berganda fungsi logaritma menghasilkan persamaan logaritma (persamaan 10). Selanjutnya dikembangkan analisis antilog terhadap persamaan (10) dan diperoleh persamaan dalam bentuk perpangkatan yang akan digunakan untuk memprediksi nilai koefisien h ($W/m^2.C$), yakni persamaan (11). Penyelesaian lebih lanjut terhadap hasil analisis diatas dilakukan untuk memperoleh nilai koefisien penghantaran panas permukaan (h) prediksi seperti ditunjukkan pada persamaan (12)

$$\text{Log} \left(\frac{h.d_b}{k_m} \right)_{\text{Pred}} = \text{Log}(-0,06558) - 0,207 \text{Log} \left(\frac{k_m}{\rho_m \cdot C_{p_m} \cdot N \cdot d_b^2} \right) + 0,138 \text{Log} \left(\frac{d_b}{d_m} \right) \quad (10)$$

$$\left(\frac{h.d_b}{k_m} \right)_{\text{Pred}} = 0,8589 \left(\frac{k_m}{\rho_m \cdot C_{p_m} \cdot N \cdot d_b^2} \right)^{-0,207} \left(\frac{d_b}{d_m} \right)^{0,138} \quad (11)$$

$$h_{\text{Pred}} = 0,8589 \left(\frac{k_m}{d_b} \right) \left(\frac{k_m}{\rho_m \cdot C_{p_m} \cdot N \cdot d_b^2} \right)^{-0,207} \left(\frac{d_b}{d_m} \right)^{0,138} \quad (12)$$

digunakan dalam penentuan nilai prediksi terhadap suhu model (T) setiap saat dengan memanfaatkan persamaan (2). Adapun gambaran mengenai riwayat suhu (T) hasil observasi dan prediksi dari berbagai perlakuan pada rerata suhu media penyangraian 120°C dengan berbagai kecepatan putar pengadukan (N) dan berbagai ukuran diameter butiran media (d_m) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva suhu pada berbagai perlakuan kecepatan putar pengadukan (N) untuk berbagai diameter butiran media penyangrai (d_m) : (a) $N_1 = 8 \text{ rpm}$; (b) $N_2 = 16 \text{ rpm}$ dan (c) $N_3 = 24 \text{ rpm}$.

Uji Validitas

Analisis uji validitas untuk model prediksi nilai peubah ($h.d_m/k_m$) terhadap nilai-nilai observasinya dengan uji regresi linier menunjukkan nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,956$) yang memuaskan (valid) karena dihasilkan nilai hasil uji yang mendekati nilai satu. Diagram uji validitas (uji grafis) dari nilai prediksi terhadap nilai observasi tersebut diperlihatkan pada Gambar 1.

Adapun uji validitas model prediksi terhadap nilai-nilai observasi koefisien penghantaran panas permukaan (h) menunjukkan hasil yang juga memuaskan yakni dengan nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,956$), seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Uji validitas diatas akan dapat memberikan hasil uji yang cukup shahih (valid) pada kondisi batasan uji : a) rerata suhu media penyangrai 120°C ; b) kecepatan putar pengadukan antara 8 – 24 rpm dan c) diameter butiran media antara 0,223 – 1,020 mm.

Uji Kepekaan Model

Uji kepekaan model dilakukan terhadap persamaan (12) dengan mengubah parameter bebasnya (sebagai variabel masukan) berupa : kecepatan putar pengadukan (N) dan diameter butiran media (d_m) serta nilai prediksi koefisien penghantaran panas permukaan (h) sebagai variabel keluaran dengan bagan uji seperti terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Bagan uji kepekaan model koefisien penghantaran panas permukaan h .

No.	Variabel Masukan		Variabel Keluaran
	$N \text{ (rpm)}$	$d_m \text{ (mm)}$	Nilai Koefisien $h \text{ (W/m}^2\text{C)}$
1	8	0,223	287,091
	16	0,223	331,385
	24	0,223	360,399
2	16	0,223	331,385
	16	0,569	287,952
	16	1,020	259,926

Uji kepekaan model pengaruh variabel masukan terhadap variabel keluaran secara kuantitatif diperoleh hasil sebagai berikut :

1) Kecepatan putar pengadukan (N)

Hasil uji kepekaan model dengan perubahan kecepatan putar (N) antara 8 - 16 rpm memberikan perubahan nilai prediksi koefisien

... atau berkisar antara 15,43 - 25,54 %. Dengan demikian koefisien penghantaran panas permukaan (h) cukup peka terhadap perubahan kecepatan putar pengadukan (N).

2) Diameter butiran media (d_m)

Hasil uji kepekaan model dengan perubahan diameter butiran media (d_m) antara 0,346 - 0,797 mm memberikan perubahan (menurun) terhadap nilai prediksi koefisien penghantaran panas permukaan (h) sebesar 43,433 - 71,459 ($W/m^2\text{C}$) atau berkisar antara 13,11 - 21,56 %. Oleh karenanya dapat dikatakan nilai koefisien penghantaran panas permukaan (h) cukup peka terhadap perubahan diameter butiran media (d_m).

Hasil analisis lebih lanjut terhadap nilai koefisien h untuk memperoleh nilai bilangan $Biot$ dihasilkan nilai bilangan hasil observasi dan prediksi yang relatif kecil pada berbagai perlakuan penyangraian model bola logam (kuningan) akibat dari nilai konduktivitas termal yang relatif besar (k kuningan = $104 W/m^{\circ}C$) dan ukuran diameter model biji yang relatif kecil ($d_b = 15$ mm) pada rerata suhu media penyangraian (pasir) $120^{\circ}C$. Lain halnya dengan konduktivitas termal model bahan tembikar yang nilainya relatif kecil (k tembikar = $1,0 W/m^{\circ}C$) sehingga diperoleh nilai bilangan $Biot$ yang relatif besar ($N_{Bi} > 0,1$). Dengan demikian untuk penerapan model analisis kapasitas panas tergabung (*Lump heat capacity analysis*) harus dilaksanakan secara selektif dalam kaitannya dengan kondisi diameter dan konduktivitas termal bahan (biji) selain besarnya nilai koefisien penghantaran panas yang terjadi.

Dalam penerapannya lebih lanjut untuk bahan biji-bijian hasil pertanian tampaknya akan lebih selektif mengingat pada umumnya komoditas tersebut memiliki nilai konduktivitas termal (k) yang relatif kecil ($< 1 W/m^{\circ}C$). Sehingga untuk penerapan model analisis kapasitas panas tergabung harus lebih selektif, mengingat pada umumnya produk biji-bijian hasil pertanian akan mengalami penurunan kualitas akibat proses pengeringan konduksi atau penyangraian dengan suhu media penyangrai yang relatif tinggi ($> 110^{\circ}C$) (Richard dan Raghavan, 1984).

KESIMPULAN

Berdasar pada pelaksanaan pengamatan di lapangan dan hasil analisis dapat diimpulkan bahwa :

1. Dengan pendekatan analisis dimensi untuk koefisien penghantaran panas permukaan dalam penyangraian pada suhu media (pasir) $120^{\circ}C$ diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$h_{pred} = 0,8589 \left(\frac{k_m}{d_b} \right) \left(\frac{k_m}{\rho_m \cdot C p_m \cdot N \cdot d_b^2} \right) \left(\frac{d_b}{d_m} \right)$$

2. Penerapan nilai koefisien h_{pred} dari model tersebut untuk memprediksi suhu bahan selama proses penyangraian memberikan hasil yang memuaskan.
3. Hasil uji kepekaan model menunjukkan variabel/peubah masukan berupa kecepatan putar pengadukan (N) dan diameter media (pasir) (d_m) adalah cukup peka terhadap perubahan nilai prediksi koefisien penghantaran panas permukaan yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Finey, E.E., Mohsenin, N.N. and Hovanesian, J.D., 1963. The thermal efficiency of conduction drying of shelled maize and the effect of temperature and kernel injury on drying rate. *J. Agric. Eng. Res.* 8 : 62-69.
- Glenn Murphy, C.E., 1950. *Similitude in Engineering*. The Ronald Press Company, New York.
- Holman, J.P., 1984. *Experimental Methods for Engineers*. Mc. Graw Hill Book, Inc., New York.
- Keey, R.B., 1972. *Drying principles and practice*. Pergamon Press, Oxford.
- Kreith, F., 1973. *Principles of Heat Transfer* (Third Edition). Harper and Row Publishers, Inc. New York.
- Mujumdar, A.S., 1997. *Drying Fundamentals*, In Baker, C.G.J. (editor): *Industrial Drying of Food*, Blackie Academic and Professional, London.
- Ozisik, M.N., 1980. *Heat Conduction*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Richard, P. and G.S.V. Raghavan, 1984. *Drying and Processing by Immersion in A Heated Particulate Medium*, in *Advanced in Drying*, vol.3 by Mujumdar, A.S. (editor). Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- Watkins, R.K. and O.K. Shupe, 1976. *Introduction to Experimentation*. Engineering Experiment Station Utah State University, Logan, Utah.